

приводит к отрыву тела и наблюдается увеличение величины зазора d . Частота периодически меняющегося значения зазора совпадает с частотой заданных возмущений, при этом фаза колебаний не совпадает. Тело с некоторым отставанием реагирует на изменение скорости вращения полости, поскольку находясь в «подвешенном» состоянии взаимодействует со стенкой через слой жидкости, а не напрямую.

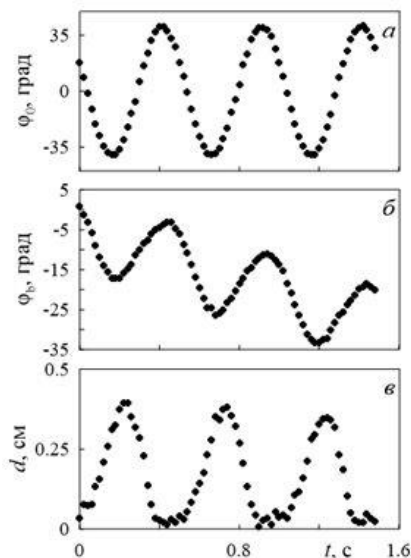


рис.2. Изменение со временем амплитуды азимутальных колебаний полости (а), амплитуды азимутальных колебаний тела (б) и зазора между телом и стенкой полости (в) при $\Omega_{rot}=\Omega_{lib}=12.6$ рад/с и $\varepsilon=0.7$

Список публикаций:

- [1] Kozlov V.G. Solid-body dynamics in cavity with liquid under high-frequency rotational vibration // *EPL (Europhysics Letters)*. 1996. Vol. 36. No. 9. P. 651.
- [2] Kozlov N.V., Vlasova O.A. Behavior of a heavy cylinder in a horizontal cylindrical liquid-filled cavity at modulated rotation // *Fluid Dynamics Research*. 2016. Vol. 48. No. 5. P. 055503
- [3] Vlasova O.A., Kozlov V.G., Kozlov N.V. Lift Force Acting on a Heavy Solid in a Rotating Liquid-Filled Cavity with a Time-Varying Rotation Rate // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2018. T. 59. №. 2. C. 219-228.

Численное исследование динамики двух близкорасположенных деформируемых капель в сдвиговом потоке

Фаткуллина Назгуль Байтулловна

Абрамова Ольга Александровна, Булатова Айгузель Загировна

Центр Микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем

Башкирский государственный университет

Абрамова Ольга Александровна, к.ф.-м.н.

nazgulbay1999@gmail.com

В природе широко распространены различные типы дисперсных систем, такие как эмульсии, суспензии и пузырьковые жидкости. Эмульсии, например, активно применяются во многих отраслях промышленности, науки и техники, включая нефтегазовую отрасль, биофизику, пищевую промышленность. Особенно актуальным является изучение реологических характеристик таких систем «жидкость-жидкость». Результаты исследований, проводившихся в течение длительного времени, показали, что микроструктура эмульсий значительным образом влияет на реологию всей системы в целом.

В настоящей работе исследуется динамика двух близкорасположенных деформируемых капель в объеме вязкой несжимаемой жидкости под действием сдвигового потока. Процессы изотермические и рассматриваются при малых числах Рейнольдса и умеренных числах Струхала. Таким образом, течение жидкостей описывается уравнениями Стокса при следующих граничных условиях: на границе раздела фаз скорости жидкостей совпадают и задан вектор разности нормальных напряжений. Для решения поставленной задачи применялся трехмерный метод граничных элементов (МГЭ) [3], который позволяет значительно уменьшить вычислительную сложность задачи. В данном случае исходные дифференциальные уравнения, описывающие поведение функции внутри и на границе области преобразовываются в интегральные уравнения,

которые связывают только значения на границе раздела фаз. В связи с этим исчезает необходимость в дискретизации всей трехмерной области, то есть только поверхности капель покрыты треугольной сеткой.

В случае сеток небольшого размера используется неускоренная версия МГЭ. Однако при увеличении масштаба задачи возникают проблемы, обусловленные нехваткой памяти вычислительной системы. В таком случае необходимо ускорение метода граничных элементов. Для решения данной проблемы был разработан модуль матрично-векторного произведения, реализованный на графических процессорах (GPU) с использованием технологии CUDA, в котором по отдельности «на лету» вычисляется каждый элемент матрицы по заданным формулам. В данном случае в памяти хранятся только результаты матрично-векторного произведения, так как нет необходимости в хранении всей матрицы. Таким образом, сокращается время вычислений и появляется возможность решения задач размером до сотен тысяч расчетных узлов на одной рабочей станции. Метод граничных элементов, ускоренный на GPU и успешно реализованный авторами ранее, более подробно описан в работах [1, 2].

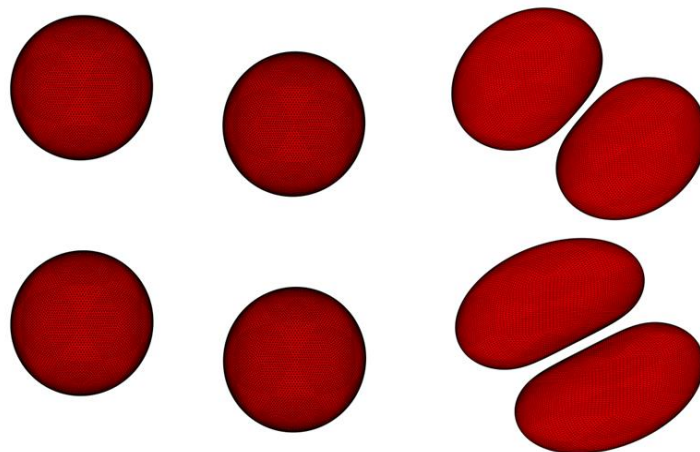


рис.1. Динамика двух близкорасположенных капель в сдвиговом потоке в плоскости xz в различные моменты времени при $Ca=0.1$, $\lambda=5$ (сверху) и $Ca=0.4$, $\lambda=5$ (снизу), расстояние между координатами центров масс в начальный момент времени $dx=3$, $dy=0.5$, $dz=0$.

Рассматривались две капли с высокой степенью дискретизации, содержащей 20 480 треугольных элементов. В данной работе была изучена динамика капель в сдвиговом потоке при различных параметрах, таких как, капиллярное число $Ca = \frac{\mu_1 a G}{\gamma}$, где μ_1 - динамическая вязкость несущей жидкости, a - радиус капли, G - скорость сдвига, γ - коэффициент поверхностного натяжения, λ - отношение вязкостей внутри и снаружи капель, а также расстояние между координатами центров масс капель Δ . Для многопараметрического исследования динамики капель были проведены расчеты для широкого диапазона капиллярных чисел и соотношений вязкостей. Расстояние между центрами капель варьировалось от 0.5 до 1. В начальный момент времени центр каждой капли располагается в определенной точке пространства, далее под действием сдвигового потока происходит перемещение и деформация капель. На (рис. 1) представлены результаты моделирования динамики капель с одним и тем же соотношением вязкости внутренней и внешней жидкости $\lambda = 5$, но при разных значениях капиллярного числа $Ca = 0.1$ и $Ca = 0.4$. Изначально капли были сферическими, равного радиуса, и с расстояниями между координатами центров масс: $dx = 3$, $dy = 0.5$, $dz = 0$. С течением времени расстояние между поверхностями капель уменьшается до минимального значения h_{min} . Но ввиду отсутствия сил Ван-дер-Ваальса в рассматриваемой модели коалесценция капель не происходит.

Рассмотрена трёхмерная динамика деформируемых капель равного радиуса в сдвиговом потоке в широком диапазоне значений капиллярного числа и соотношения вязкостей. Проведено параметрическое исследование вклада дисперсной фазы в тензор напряжений всей системы, а также первая и вторая разности нормальных напряжений, в зависимости от времени. Рассмотрено изменение во времени минимального расстояния между поверхностями капель.

Для расчетов использовался персональный компьютер, оснащенный двумя CPU Intel Xeon 5660 и графической картой NVIDIA Tesla K20. Программные модули разработаны в среде MATLAB.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта президента РФ МК-549.2019.1.

Список публикаций:

- [1] Pityuk Yu.A., Abramova O.A., Fatkullina N.B., Bulatova A.Z. // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2019. P. 338-352.
- [2] Abramova O.A., Pityuk Yu.A., Gumerov N.A., Akhatov I.Sh. // *Communications in Computer and Information Science (CCIS)*. 2017. P. 317-330.
- [3] Pozrikidis C. // *Cambridge University Press*. 1993. P. 301-320.